

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie
měření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

**Vliv základních procesních parametrů
ohýbání na přesnost ohýbaného výlisku**

**Influence of basic process parameters
on the accuracy of bending pressed bent**

Petr Novotný
KSP - TP - B

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 42
Počet tabulek: 5
Počet příloh: 3
Počet obrázků: 29

Datum: 24. 5. 2013

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Student: Petr Novotný

Téma práce: Vliv základních procesních parametrů ohýbání na přesnost ohýbaného výlisku

Influence of basic process parameters on the accuracy of bending pressed bent

Číslo BP: KSP - TP - B

Vedoucí BP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

Konzultant BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Práce se zabývá procesními parametry na přesnost ohýbaných výlisků. V první části práce se rozebírají základní charakteristiky ohýbání a jejich souvislost s přesností ohýbaných výlisků. Dále je práce zaměřena na nejvýznamnější faktor ovlivňující přesnost dílů a to odpružení. V experimentu se ověřuje závislost odpružení vzhledem k mechanickým vlastnostem materiálu. Tato práce je provedena na hydraulickém CNC ohraňovacím lisu APHS 2104 x 60, na němž bylo provedeno testování pracovního programu.

Abstract:

The work deals with the process parameters on the accuracy of bent parts. In the first part we discuss the basic characteristics of bending and their relation to the accuracy of bent parts. The thesis is focused on the most important factor affecting the accuracy of parts and suspension. The experiment verifies the dependence of suspension due to the mechanical properties of the material. This work is carried out on the hydraulic CNC press brake APHS 2104 x 60, where testing was carried out the work program.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....
Petr Novotný
Kosovo Pole 665
471 24 Mimoň

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Ohýbání - teoretická část.....	9
2.1. Rozložení napětí v ohybu	10
2.1.1. Ohýbání s malým zakřivením	12
2.1.2. Ohýbání s velkým zakřivením	12
2.2. Základní charakteristiky ohybu	15
2.2.1. Poloha neutrální osy.....	15
2.2.2. Stanovení délky polotovaru	15
2.2.3. Výpočet ohybové síly	17
2.3. Přesnost při ohýbání	19
2.3.1. Odpružení.....	19
2.3.2. Eliminace odpružení	24
3. Experimentální část.....	26
3.2. Zkouška tahem	26
3.3. Ohraňování	30
3.4. Výsledné hodnoty ohýbaných vzorků	34
4. Vyhodnocení odpružení	38
5. Závěr	40
6. Seznam literatury	41
7. Seznam příloh.....	42

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Jednotka	Význam
σ_l	MPa	Obvodové napětí
σ_2	MPa	Napětí podél osy válce (šířky)
σ_3	MPa	Radiální napětí
R_e, σ_k	MPa	Mez kluzu
R_m	MPa	Mez pevnosti
σ_o	MPa	Ohybové napětí
E	MPa	Modul pružnosti
p	MPa	Tlak
R_o, R_ω	mm	Vnitřní poloměr ohybu
R_z	mm	Vnější poloměr ohybu
R_k	mm	Zaoblení vstupu ohybnice
R_1	mm	Poloměr ohybu před odpružením
R_2	mm	Poloměr ohybu po odpružení
ρ, r	mm	Poloměr křivosti
t	mm	Tloušťka plechu
t_l	mm	Ztenčená tloušťka plechu
b	mm	Šířka plechu
l	mm	Vzdálenost podpor u nosníku
L	mm	Délka oblouku
S	mm ²	Průmět kalibrované plochy
α, φ	°	Úhel ohybu
α_1	°	Úhel ohybu před odpružením
α_2, α'	°	Úhel ohybu po odpružení
β	°	Úhel odpružení
F	N	Zatěžovací síla
F_k	N	Kalibrační síla
M_o	N·mm	Ohybový moment
J_y	kg · m ²	Plošný moment setrvačnosti k y
x	-	Koeficient zakřivení R_o/t
μ	-	Poissonova konstanta
ε_{pl}	-	Plastická deformace
ε_{el}	-	Pružná (elastická) deformace
ε_c	-	Celková deformace
k	-	součinitel určující polohu neutrální plochy

1. Úvod

Ohýbané součásti mají v dnešní době dominantní postavení na trhu. Lze je nalézt skoro ve všech montážních celcích. Velký rozvoj v oblasti ohýbání byl zaznamenán v posledních letech z důvodu efektivnosti, zkrácení strojních časů, menších nákladů na výrobu a zjednodušení pracovních postupů a metod. Vyskytují se v mnoha průmyslových odvětvích jako strojírenství, automobilový průmysl, potravinářský průmysl a podobně. V automobilovém průmyslu jsou to například rámy, polotovary pro výrobu převodovek a výfuky. Další uplatnění nacházejí například při výrobě součástí zemědělských strojů, polotovarů přírub, ráfků pro jízdní kola, součástí kovového nábytku, plotů, silničního značení a veřejného osvětlení. V loděřství a stavebnictví je užití ohýbaných součástí velmi široké, například při výrobě mostních konstrukcí, konstrukcí hal, železničních a silničních tunelů, schodišť, výtahů, eskalátorů, vrat a podobně. Žádná strojírenská firma se v dnešní době neobejde bez ohýbacího stroje. Ty mohou být různého charakteru, avšak nejčastěji jsou využívány ohraňovací lisy (obr. 1.1), které jsou v dnešní době plně automatizovány a vývoj jejich automatizace je pořád zdokonalován. Lze ohýbat různé materiály, jako ocelové plechy, trubky, pásy, plastové polotovary a další materiály, které mají dostatečnou tažnost pro ohyb, aby nedošlo k porušení. Materiály, které se používají pro ohýbání, jsou v dnešní době také zdokonalovány, hlavně co se týče povrchových úprav. [1]

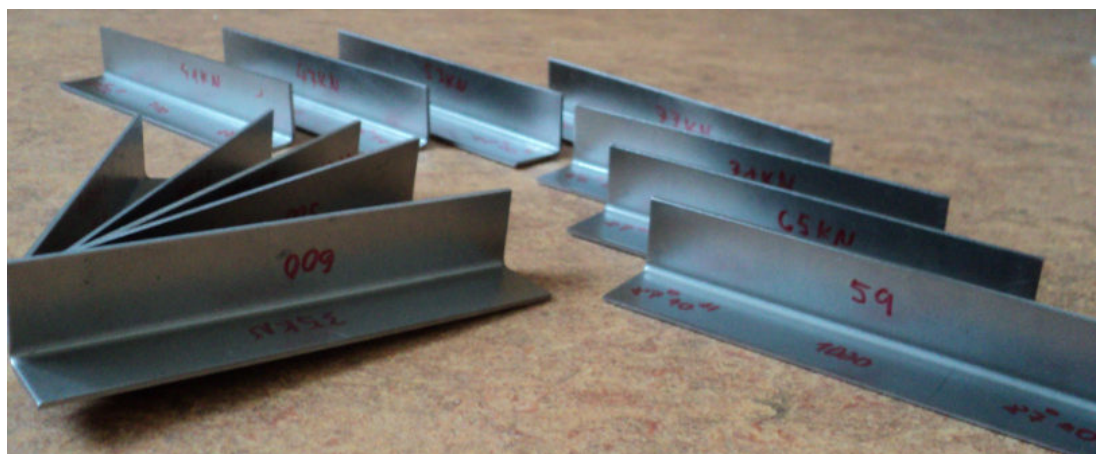


Obr. 1.1: CNC ohraňovací lis APHS 2104 x 60.

Ohýbání je složitý proces, který ovlivňuje řada faktorů. Tento soubor komplexních charakteristik zahrnuje vliv materiálu výlisku, jeho jakost a tloušťku, tribologické podmínky procesu, kinematiku tvářecího stroje, konstrukci nástroje a další. Nevhodné nastavení těchto podmínek může mít za následek vznik vad na výlisku, které se dělí do dvou skupin. Do první patří oblast porušení stability, mezi něž patří iniciace makroskopických trhlin, limitní ztenčení, přeložky a zvlnění. Druhá pak představuje problematiku geometrických vad, mezi něž patří především odpružení. [2]

Zaměření této bakalářské práce je právě na tuto problematiku. Přiblížení jednotlivých faktorů na přesnost ohýbaného výlisku. Jakým způsobem jsou ovlivňovány a jak je můžeme eliminovat. Konkrétně se práce zabývá ohybem do tvaru "V".

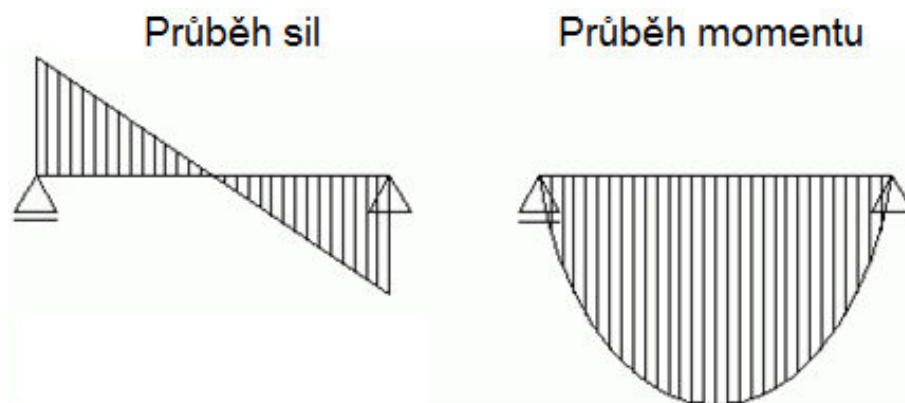
Cílem BP je ověření teoretických úvah na experimentu, který bude vykonáván na CNC ohraňovacím lisu APHS 2104 x 60. Budou se zjišťovat hodnoty odpružení při různém nastavení mechanických vlastností v programu lisu. Hodnoty odpružení ohnutých vzorků (obr. 1.2) vyjádříme graficky pro různě nastavované mechanické vlastnosti.



Obr. 1.2: Ohnuté vzorky z experimentální části.

2. Ohýbání - teoretická část

Ohýbání je proces plošného tváření vyvolaný působením momentů vnějších sil (obr. 2.1). V místě ohybu se průřezy kolmé k rovině momentu k sobě natáčejí kolem osy ležící mimo tvářený materiál. Ohnuté (prostorové) tvary lze rozvinout. Při ohýbání tvoří plastická deformační zóna zpravidla jen velmi malou část objemu



Obr. 2.1: Průběhy sil a momentu při spojitém zatížení. [3]

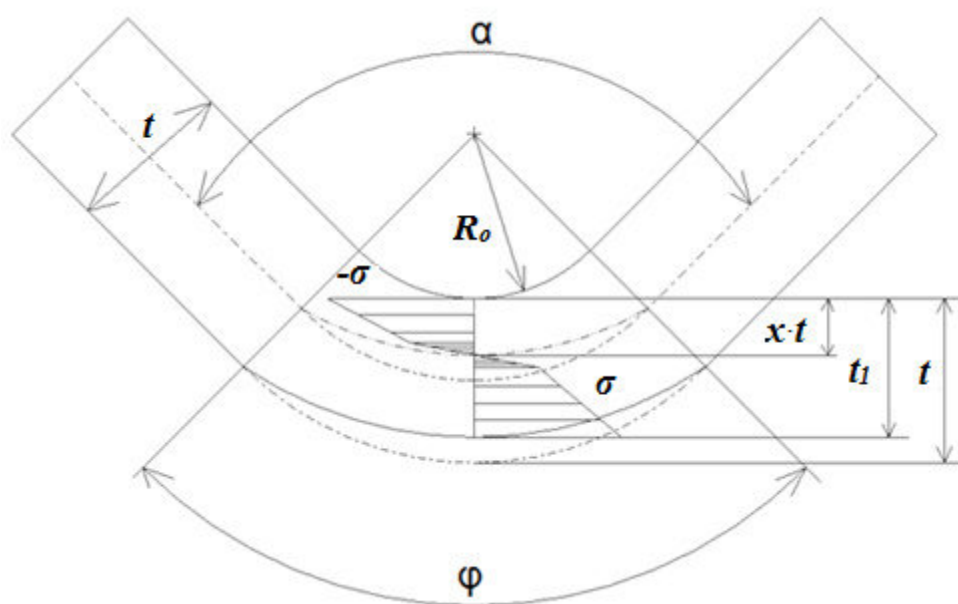
polotovaru. Poměr plochy povrchu polotovaru k objemu zůstává během procesu prakticky konstantní. Pružné deformace materiálu tvoří tak významnou část celkových deformací, že nemohou být zanedbány. [4]

Ohýbání zahrnuje širokou paletu technologií za studena i za tepla, přičemž se ve většině případů využívá tváření za studena. Ohýbání za tepla volíme v případě velkých průřezů materiálu o vyšší pevnosti. Technologie ohýbání se užívá pro tváření mnoha polotovarů jako například plechů, pásů, trubek, profilů, tyčí a podobně. [1]

Vzhledem k předpokládanému rozsahu zadané práce bude problematika zúžena pouze na ohýbání **plechů a pásů** v souvislosti s jejich pružnými deformacemi při ohraňování.

2.1. Rozložení napětí v ohybu

Pro dosažení trvalého ohybu je nutné, aby ohybové napětí bylo nad mezí kluzu R_e , ale nesmí překročit mez pevnosti R_m , jinak by mohlo dojít k porušení soudržnosti tvářeného materiálu. Kolem střední části průřezu jsou tahová napětí malá a dosahují meze úměrnosti. Na vnitřní straně ohýbaného polotovaru vzniká tlakové napětí $-\sigma$ a na vnější straně zase dochází k napětí tahovému σ (obr. 2.2). Deformace materiálu je pružně-plastická.



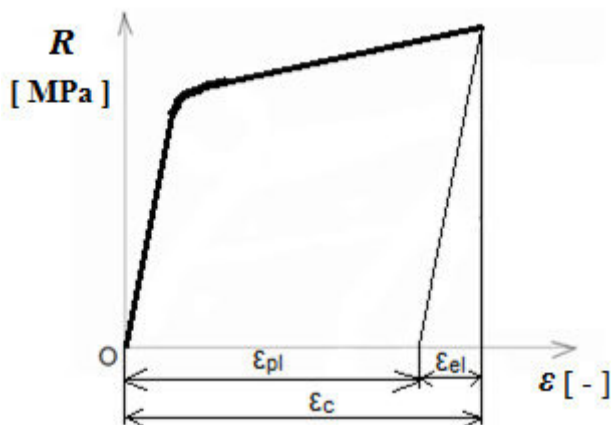
Obr. 2.2: Průběhy napětí v ohybu.

Z obr. 2.2 je zřejmé, že v místě $x \cdot t$, kde se mění tahové a tlakové napětí, je vrstva bez napětí a též i bez deformace. Tato neutrální plocha je důležitá při zjišťování délky výchozího polotovaru ohýbané součásti. Se zmenšujícím se poloměrem ohybu R_o se vlivem působení napětí a deformace průřezu neutrální plocha posouvá směrem ke stlačeným vláknům. Při ohýbání jsou krajní vlákna v pohybu a může nastat změna průřezu. [1]

Pro tuto práci je důležité vyzdvihnout pojem pružně-plastická deformace (obr. 2.3). V podstatě jde o průběh zatížení, kdy nejprve vzniká pružná deformace, a kde platí Hookův zákon. Když se rostoucí napětí R dostane do bodu meze kluzu, tak nastávají trvalé plastické deformace, kde se udržuje soudržnost až do překročení meze pevnosti, kde se nachází bod prvního porušení.

Důležité pojmy

Pružná deformace ε_{el} je schopnost materiálu k navrácení k původnímu stavu po odlehčení. Plastická deformace ε_{pl} je schopnost materiálu k celistvému přetvoření tvaru.



Obr.2.3: Zobrazení pružně-plastických deformací.

Vztah mezi plastickou a elastickou deformací je dán vztahem (2.1)

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{el} \quad (2.1)$$

kde je:

ε_{pl} ... Plastická deformace [-]

ε_{el} ... Pružná (elastická) deformace [-]

ε_c ... Celková deformace [-]

Všeobecná podmínka napjatosti lze popsat vztahem (2.2) [5]

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \quad (2.2)$$

kde je:

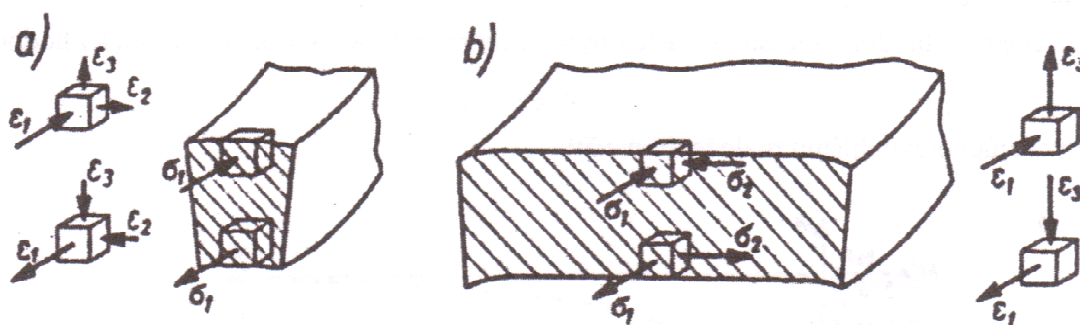
σ_1 ... Obvodové napětí [MPa]

σ_2 ... Napětí působící podél osy válce (šířky) [MPa]

σ_3 ... Radiální napětí [MPa]

2.1.1. Ohýbání s malým zakřivením

Při ohýbání úzkých tyčí se šířka zvětšuje na vnitřní straně ohybu a zmenšuje se na straně vnější (obr. 2.4). Avšak u materiálů značně širokých jsou deformace materiálu v jeho šířce stažené a ve střední části širokých pásů k nim prakticky vůbec nedochází. Dochází tak k rovinné deformaci, při které se změna délky vlákna v podélném směru kompenzuje výhradně změnou jeho tloušťky ve směru radiálním. [6]



Obr. 2.4: Schéma napjatosti a deformace v příčném průřezu
a - úzkých tyčí, b - širokých pásů. [6]

2.1.2. Ohýbání s velkým zakřivením

K určení rozložení napětí v průřezu značně zakřiveného pásu budou prozkoumány podmínky rovnováhy elementu vymezeného válcovými povrchy o poloměrech r a $r + dr$, a rovinami procházejícími středem ohybu, tvořící úhel $d\theta$, jak je patrné z obr. 2.5. Na element působí napětí obvodová σ_1 , radiální σ_3 , ale i napětí působící podél osy válce (šířky) σ_2 .

Součtem průmětů všech sil působících na uvažovaný element ve směru radiálním vznikne rovnice [5]

$$\sigma_1 dr b d\theta + \sigma_3 dr b d\theta - (\sigma_3 + d\sigma_3)(r + dr) b d\theta = 0,$$

která po zjednodušení bude mít tvar dle vztahu (2.3)

$$\frac{d\sigma_3}{dr} + \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{r} = 0. \quad (2.3)$$

Pro předpokládanou rovinnou deformaci musí být napětí σ_2 podle (2.2) rovno dle vztahu (2.4)

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3). \quad (2.4)$$

Podmínkou pro tváření kovů je přechod z pružného (elastického) stavu do stavu tvárného, proto je důležité překonat mez kluzu σ_K , která se vypočítá dle vztahu (2.5)

$$\sigma_K = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (2.5)$$

Dosazením rovnice (2.3) do (2.5) dostaneme vztah (2.6)

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_K, \quad (2.6)$$

který po zavedení výrazu $\sigma'_K = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_K$ napíšeme vztahem (2.7)

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \pm \sigma'_K. \quad (2.7)$$

Po dosazení vztahu (2.7) do rovnice (2.3) dostaneme diferenciální rovnici (2.8)

$$\pm \frac{dr}{r} = \frac{d\sigma_3}{\sigma'_K}, \quad (2.8)$$

jejíž obecné řešení má tvar (2.9)

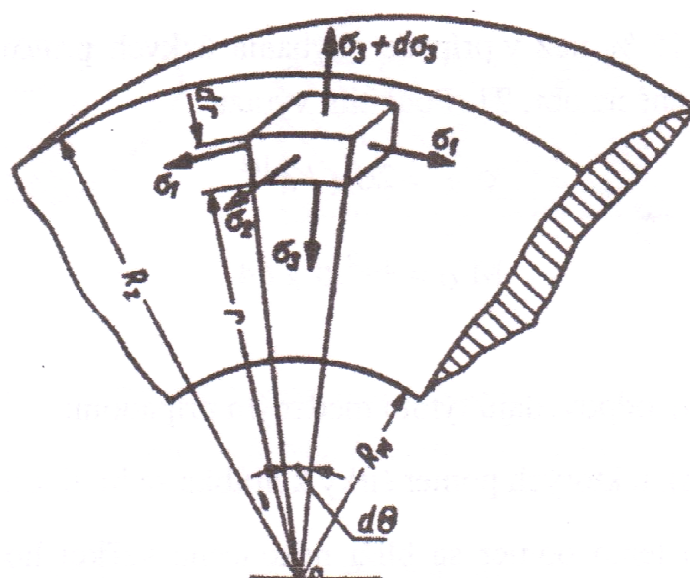
$$\pm \ln r + C = \frac{\sigma_3}{\sigma'_K}. \quad (2.9)$$

Znaménko mínus před výrazem $\ln r$ se vztahuje na oblast stlačování a znaménko plus - oblast prodlužování. Konstantu C je možno určit z předpokladu, aby radiální napětí σ_2 zanikala na vnitřním (R_ω) a vnějším (R_z) povrchu ohýbaného pásu. Po přihlédnutí k tomuto předpokladu dostaneme na straně stlačování vztah (2.10) [5]

$$\sigma_3 = \sigma'_K \ln \frac{r}{R_\omega}, \quad (2.10)$$

a na straně prodlužování vztah (2.11)

$$\sigma_3 = - \sigma'_K \ln \frac{R_Z}{r}. \quad (2.11)$$



Obr. 2.5: Elementární rozložení napjatosti v ohybu. [6]

Obecně napětí při ohýbání z velké části ovlivňuje přesnost výlisků. Například nám mohou vzniknout natočením vlivem rozdílných napětí ve směru tloušťky plechu. Snaha každého ohýbacího stroje je udržet stejné silové a napěťové poměry po celé šíři plechu, což zajistíme tuhostí celého procesu a správnou konstrukcí nástroje. Pro ukázkou elementárních rozložení napjatostí v ohybu je na obr. 2.5.[2]

2.2. Základní charakteristiky ohybu

2.2.1. Poloha neutrální osy

Na neutrální ose není napětí a při ohýbání se ani neprodlužuje ani nezkracuje. Neutrální osa není totožná s osou těžiště. U velkých poloměrů ohybu, kde $R_o > 12t$ se předpokládá, že neutrální plocha je uprostřed tloušťky ohýbaného materiálu a poloměr se vypočte ze vztahu (2.12) [1]

$$\rho = R_o + 1/2 t , \quad (2.12)$$

kde je:

R_o ... vnitřní poloměr ohybu [mm]

t ... tloušťka plechu [mm]

ρ ... poloměr zakřivení [mm]

Pro menší poloměry ohybu $R_o < 12t$ se vlivem působení napětí a deformace průřezu neutrální plocha posouvá směrem ke stlačeným vláknům a její poloměr se vypočte ze vztahu (2.13) [1]

$$\rho = R_o + x \cdot t , \quad (2.13)$$

kde je:

x ... koeficient zakřivení R_o/t - posunutí neutrální osy [-]

2.2.2. Stanovení délky polotovaru

Délka polotovaru pro danou součást L je rovna součtu všech délek rovných úseků konečné součásti a délek oblouků v neutrální vrstvě v místě ohybu. Délku oblouku vypočteme ze vztahu (2.14) [1]

$$L = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot (R_o + x \cdot t), \quad (2.14)$$

kde je:

L ... délka oblouku [mm]

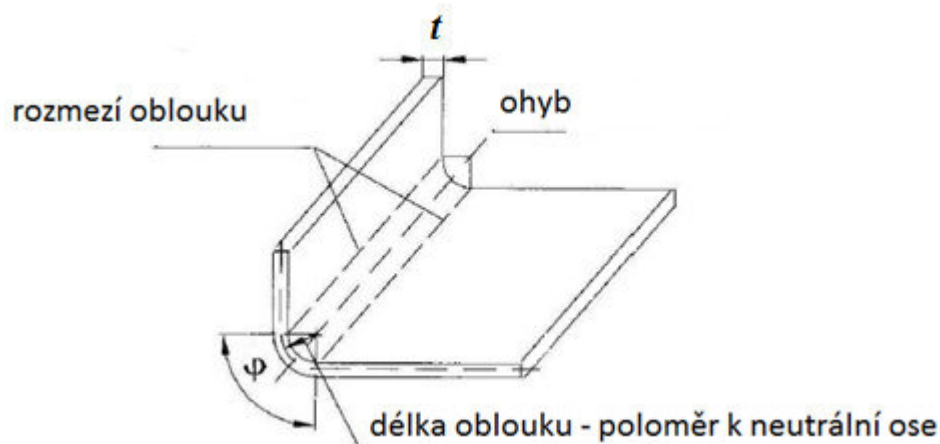
φ ... úhel ohybu [°]

t ... tloušťka plechu [mm]

V tabulce 2.1 je určený koeficient x podle Boljanoviče

Tab. 2.1: Koeficient x [7]

R_o/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,40	0,41	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,50

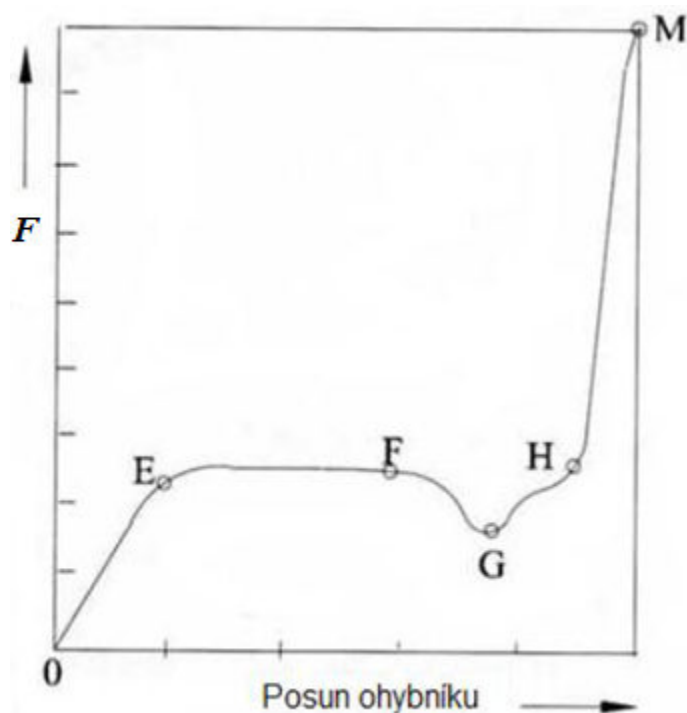


Obr. 2.6: Znázornění úhlu φ .

Délka oblouku je délka ohybu v neutrální ohybové ose pro danou hodnotu stupně ohybového úhlu. Pro velké ohybové poloměry (R_o), neutrální ohybová osa zůstává v poloze zhruba v polovině tloušťky materiálu. Velký poloměr ohybu je podle Boljanoviče považován za větší, než pětina tloušťky materiálu ($R_o > 5t$). Pro menší poloměry ohybu, neutrální ohybová osa se posouvá směrem k vnitřní ohýbané ploše, protože objem tvářeného materiálu je konstantní v plastické deformaci. Výlisek se následně ztenčuje v této deformované oblasti. Kontrakce je také v šířce obrobku, ale většinou lze tuto kontrakci zanedbat, pokud je šířka obrobku nejméně desetkrát větší, než tloušťka materiálu ($b > 10t$). Posun části neutrální osy ohybu závisí na vnitřním poloměru ohybu. [7]

2.2.3. Výpočet ohybové síly

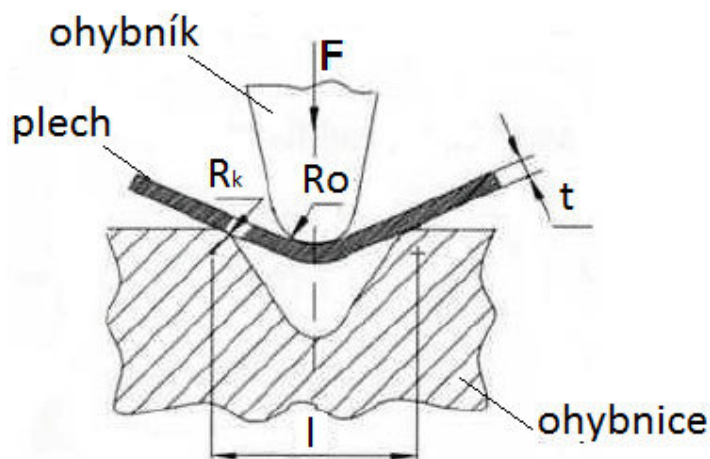
Vzhledem k dodržení předpokládaného rozsahu práce je problematika zúžena na ohyb tvaru "V", což je jeden ze základních způsobů ohýbání materiálu v praxi. Při zohlednění všech faktorů je výpočet ohýbací síly velmi složitým procesem (obr. 2.7).



Obr. 2.7: Průběh ohýbací síly v závislosti na dráze ohybníku. [8]

Volný ohyb (interval - OG), má tři části. První část je elastická deformace (OE). V druhé části je síla většinou konstantní (EF) a ve třetí části se síla snižuje, protože nastává skluz (FG). Po přechodu z oblasti kluzu se síla začíná zvětšovat do konečného bodu M.

Ohýbaný polotovár se považuje za nosník na dvou podporách ve vzdálenosti l , zatíženého uprostřed silou F . Ohýbací síla se zvětší třením polotovaru o funkční části ohýbadla až o $1/3 F$ (Obr. 2.8). [8]



Obr. 2.8: Ohýbání do tvaru "V". [8]

Vztah pro výpočet síly je dán vztahem (2.15) [2]

$$F = \frac{b \cdot t^2 \cdot R_m}{l}, \quad (2.15)$$

kde je:

F ... zatěžující síla [kN]

b ... šířka plechu [mm]

R_m ... mez pevnosti [MPa]

l ... vzdálenost podpor u nosníku [mm]

Kalibrační síla

Používá se pro zpřesnění výroby, kdy zvětšením tlaku na plech získáme přesnější hodnotu a snížíme tak úhel odpružení. Potřebné tlaky se získají z empirických tabulek a sílu vypočítáme ze vztahu (2.16) [4]

$$F_k = p \cdot S, \quad (2.16)$$

kde je:

F_k ... Kalibrační síla [N]

p ... Tlak [MPa]

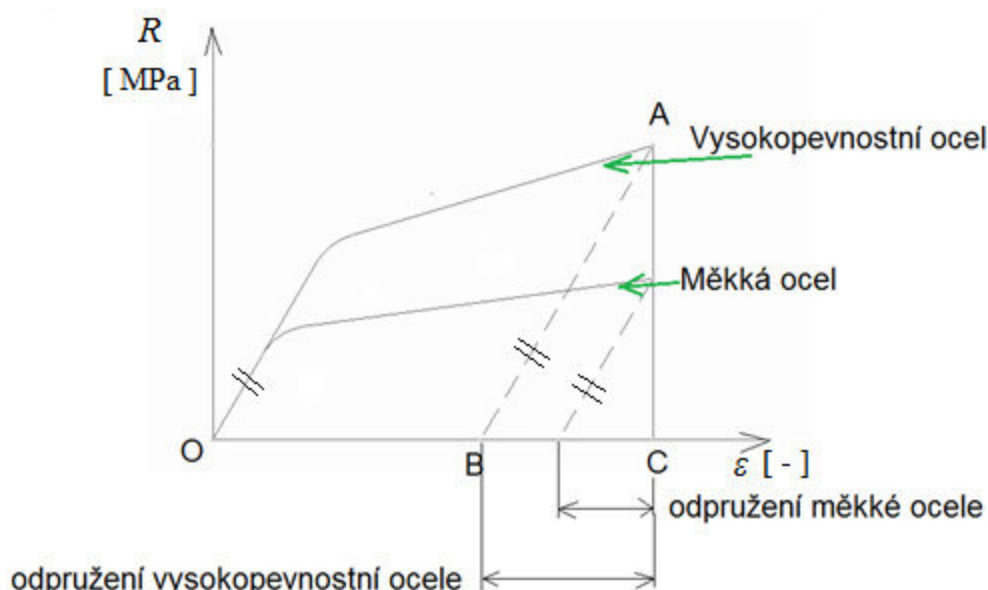
S ... Průmět kalibrované plochy [mm²].

2.3. Přesnost při ohýbání

Přesnost v technologii ohýbání závisí na řadě faktorů. Tyto činitele lze obecně rozdělit do dvou skupin - na vlivy materiálové a konstrukční. Mezi materiálové vlivy patří především typ materiálu, rovnoměrnost a rozložení mechanických vlastností, tloušťka, velikost plastických deformací a jiné. Konstrukční vlivy pak zahrnují zejména tloušťku a přesnost, stav a stupeň opotřebení nástroje, konstrukce nástroje a středění polotovaru, pracovní vůli nástroje, počet operací a podobně. Materiálové vlastnosti jsou většinou předepsány konstruktérem součásti, ale lze je ovlivňovat i technologií tváření, a to konstrukcí tvářecích nástrojů. Proto je žádoucí, aby nástroj dosahoval rovnoměrné plastické deformace polotovaru a vlastnosti zpevnění, neboť pak bude podíl pružných deformací relativně nízký. Konstrukční vlivy vyplývají z technologie a realizované konstrukce nástroje umožňují ovlivňovat rozměrovou přesnost a jakost tvářené plochy, zejména volbou geometrie činných částí, jejich kvalitou a rozměrovou přesností. [2]

2.3.1. Odpružení.

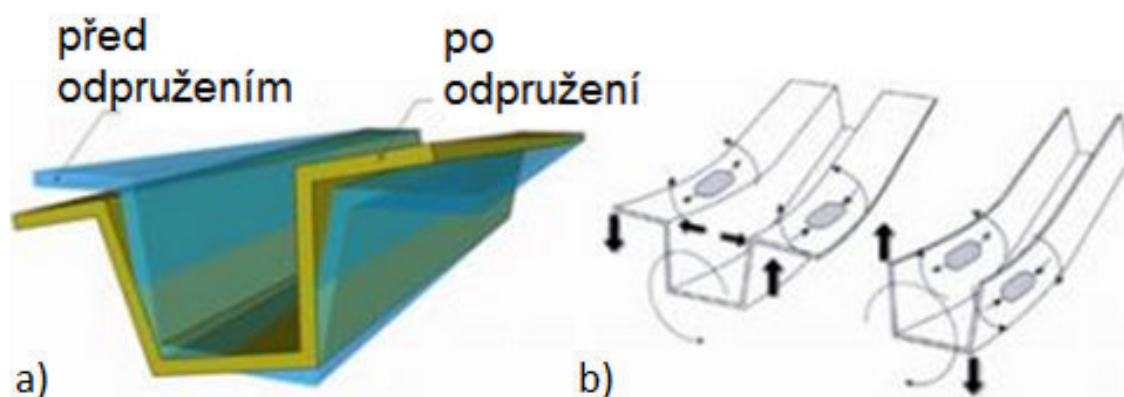
Odpružení lze charakterizovat jako nežádoucí dodatečnou deformaci výlisku vznikající relaxací napětí po odlehčení výlisku ve tvářecím nástroji. Na obrázku 2.10. je znázorněn vliv napětí R na odpružení.



Obr. 2.10: Elastické deformace na diagramu tahové zkoušky.

Ohýbaný materiál je zatěžován do oblasti plastických deformací, charakterizovaných zpevňující křivkou OA. Po uvolnění tvářecích nástrojů se nepohybujeme k nulovému napětí AC, ale AB. Odpružení je pak charakterizováno rozdílnou velikostí deformace na vodorovné ose x, například pro vysokopevnostní ocel mezi body BC. Z diagramu je tedy zřejmé, že lisovaný materiál má dominantní vliv na velikost odpružení. Velikost odpružení při výrobě výlisků závisí ovšem na řadě dalších faktorů, mezi něž patří modul pružnosti v tahu, konstrukční řešení nástroje, podmínky tváření, symetrie a tvarová složitost součásti, výsledné rozložení zbytkových napětí a podobně.

Na obrázku 2.11 je znázorněný tvar výlisku s kombinací několika typů odpružení současně. Výlisek po odlehnutí od nástroje změnil svůj tvar. Tato komplexní změna tvaru součásti je především u složitějších výlisků s většími rozměry.[2]



Obr. 2.11: Kombinace několika typů odpružení.[2]

a - odlehnutý výlisek od nástroje, b - jednotlivé změny tvaru na výlisku

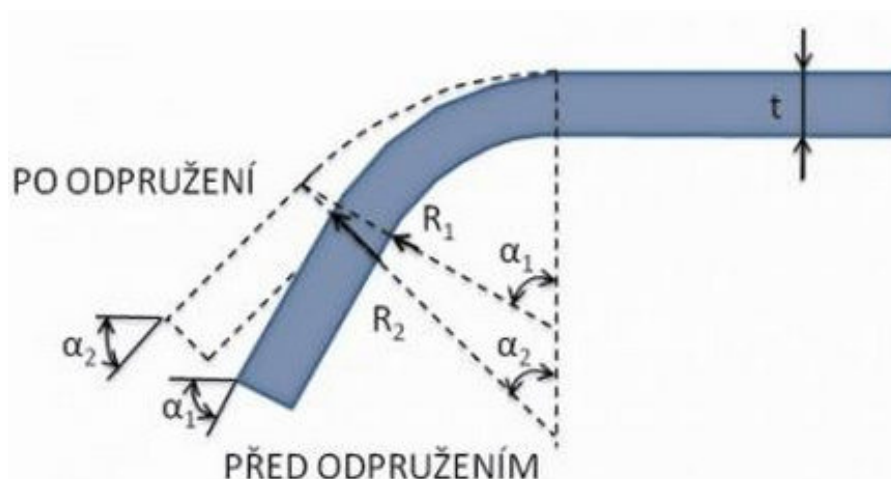
Typy odpružení

V problematice plošného tváření členíme odpružení na:

1. úhlovou změnu;
2. natočení boční stěny;
3. natočení;
4. zkřivení hrany;
5. zkřivení povrchu.

1) Úhlová změna

Úhlová změna (obr. 2.12) je definovaná jako úhlový rozdíl mezi součásti a nástrojem po odlehčení tvářecí síly. Je způsobena ohybovým momentem, vyvolaným rozdílem napětí ve směru tloušťky plechu během ohýbání přes poloměr ohybu. Představuje základní typ odpružení a má za následek zvětšení ohýbaného poloměru. [2]



Obr. 2.12: Odpružení - úhlová změna. [2]

2) Natočení boční stěny

Natočení boční stěny (obr. 2.13) představuje zakřivení vzniklé na boční stěně profilu. Zakřivení je následkem tažení plechu přes poloměr tažnice nebo tažení tažnou drážkou. Jeho příčinou je nestejně rozdělení napětí nebo napěťový gradient v tloušťce plechu. [2] Tento typ odpružení se projevuje výhradně u výlisků do tvaru "U". [2]



Obr. 2.13: Odpružení - natočení boční stěny - porovnání různých materiálových jakostí. [2]

3) Natočení

Natočení (označované také jako twist) je vzájemné pootočení dvou příčných řezů (obvykle voleny z opačných konců součástí). Vada se vyznačuje úhlovou změnou, při které může nastat posun průřezu. Natočení vzniká jako následek nevyváženého zbytkového pnutí ve výlisku. Tuto nevyváženost způsobuje krouticí moment vznikající v bočních stěnách součásti, v přírubách nebo v obou současně. Velikost natočení ovlivňuje torzní tuhost výlisku daná jeho tvarem, nevhodná volba přístřihu či rozdílné tlaky přidržovačů po stranách. Většinou se vyskytuje právě u dlouhých tenkých výlisků, které mají malou torzní tuhost. Jednou z možností eliminace tohoto typu odpružení jsou prolisy a výstužná žebra. [2]

4) Zkřivení hrany

Vada má za důsledek zkřivení hrany ohýbané součásti vůči hraně nástroje. Příčiny vzniku zakřivení hrany jsou podobné jako u natočení. V tomto případě změnu nezpůsobuje krouticí moment, ale ohybový moment v rovině kolmé na průřez. Odpružení nastane jako následek rozdílných tažných poměrů na kraji a uprostřed boční stěny součásti. Zakřivení hrany se často vyskytuje v kombinaci s natočením. [2]

5) Zkroucení povrchu

Jedná se o místní vybočení, které nastane na povrchu plechu po tváření. Tyto defekty vznikají z místní reakce na pnutí v materiálu během tváření. Klasickým případem jsou místní výstupky a prohlubně. [2]

Velikost odpružení

Při ohýbání polotovaru má materiál po odlehčení deformační síly snahu se vrátit do původního tvaru a to o určitý úhel odpružení β . Ohyb je pružně tvárnou deformací a jakmile na materiál přestanou působit vnější síly, zruší se i pružná deformace a tím se mění úhel. [1]

Odpružení závisí na vlastnostech materiálu, které jsou funkcí jeho chemického složení, struktury (tepelné zpracování), ale také na teplotě, zejména na:

- Modulu pružnosti E ,
- Poissonově konstantě μ ,
- Mezi kluzu σ_K ,
- Charakteristice zpevňování

Dále závisí na tloušťce materiálu t a poloměru zakřivení ρ , skutečném napětíovém a deformačním stavu při ohýbání a tvarové složitosti součásti [4].

Velikost odpružení lze zjistit pomocí diagramů sestavených na základě praktických zkoušek nebo pomocí vzorců (2.17) nebo (2.18) [1]

$$\operatorname{tg} \beta = 0,375 \cdot \frac{l}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E} \rightarrow \beta, \quad (2.17)$$

$$\beta = \frac{M_o l (1 - \mu^2)}{E J_y}, \quad (2.18)$$

kde je:

β ... Úhel odpružení [°]

R_e ... Mez kluzu [MPa]

k ... Součinitel určující polohu neutrální plochy v závislosti na poměru R_o/t (obr. 2.14). [-]

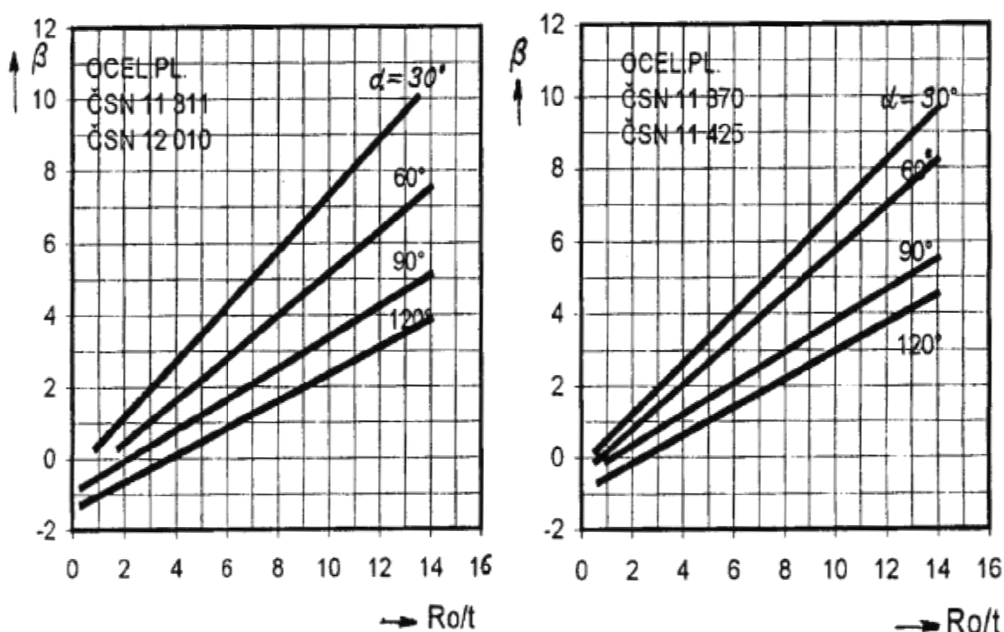
E ... Modul pružnosti [MPa]

μ ... Poissonova (materiálová) konstanta [-]

J_y ... Plošný moment setrvačnosti k ose y [kg·m²].

Diagramy pro určení odpružení

Slouží pro orientační určení velikosti odpružení v praxi. Zde jsou zpracovány jako ocel, hliník a jejich slitiny. Odpružení pro úhly $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ jsou znázorněny na obr. [1]



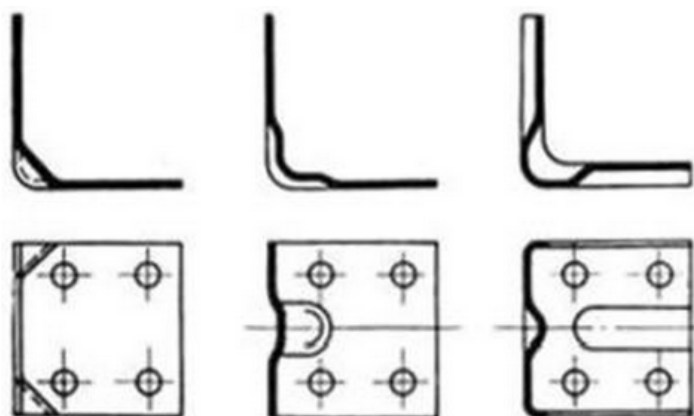
Obr. 2.14: Diagramy pro určení odpružení pro oceli 11. [1]

2.3.2. Eliminace odpružení

Odpružení materiálu při lisovacích operacích je komplexní a velmi složitá problematika. V praxi dochází v drtivé většině k interakci jednotlivých typů odpružení. Pochopením této oblasti plošného tváření můžeme eliminovat vznik odpružení, snižovat počty neshodných dílů výrobního procesu a tím pochopitelně i výrobní náklady.

Predikce a eliminace odpružení byla v minulosti řešena v drtivé většině na základě zkušeností z řešení obdobných předchozích úloh s experimentálními zkouškami zpracovaného materiálu. V současnosti je kladen důraz na efektivitu výroby a optimalizaci technologického postupu již ve fázi přípravy i z hlediska odpružení materiálu. Z tohoto důvodu se stále častěji uplatňuje výpočetní technika a moderní numerické simulace. Pomocí těchto virtuálních metod je tedy možné provádět korekce okrajových podmínek pro eliminaci odpružení již v etapě návrhu technologického postupu.

Velikost odpružení, jak plyne z předchozího textu, výrazně ovlivňuje především druh a použité materiálové jakosti. Návrh geometrie součásti a tedy i nástroje, by měl být proveden takovým způsobem, aby nebyla velikost odpružení citlivá na změnu materiálové šarže, tloušťky a dalších parametrů lisování. V řadě případů je postačující, pokud se provede úprava nástroje tak, aby bylo zabezpečeno větší přetvoření součásti, a po odlehčení se získal požadovaný tvar. Pokud je problém s dodržáním stanovené rozměrové tolerance, lze využít dodatečných vyrovnávacích operací (kalibrace). V některých případech je víceúrovňové tažení žádoucí nebo dokonce požadované. Důležité jsou lisovací operace zajišťující eliminaci odpružení. Odpružení je také možné vyloučit zpevněním materiálu v rozích rázem, vytvořením vyztužovacího žebra v místech ohybu, podbroušením pohyblivé čelisti, zaoblením dolní strany pohyblivé čelisti a přidržovače poloměrem R (obr 2.15), postupným ohýbáním s odlehčením pevné čelisti o tloušťku materiálu, zpevněním materiálu deformačním poloměrem v pevných čelistech. [2]



Obr. 2.14: Eliminace odpružení prolisem v ohýbacím rádiu. [2]

Moderní ohýbací stroje vybavené laserovým systémem měření deformací může na základě zkušebního ohybu zjistit míru odpružení pro danou materiálovou jakost a nastavit korekce nástrojů pro přesné ohýbání. [2]

3. Experimentální část

Cílem experimentu je sledování funkce ohraňovacího lisu APHS 2104 x 60 při různě nastavovaných mechanických vlastnostech v programu lisu. Ohýbané vzorky jsou z materiálu 11 373, u kterého zjistíme mechanické vlastnosti z tahové zkoušky. U vzorků z tohoto materiálu naměříme úhel odpružení a vyhodnotíme tak závislost na různě zadávaných procesních parametrech.

Procesní parametry, které se sledují jsou mez kluzu R_e , mez pevnosti R_m a modul pružnosti E .

V této práci bude popsán postup celého experimentu, popis měření a vyhodnocení veškerých platných výsledků. Veškeré úkony práce jsou rozděleny na tři části.

1. Zkouška tahem
2. Ohraňování
3. Vyhodnocení odpružení

3.2. Zkouška tahem

Před prací na lisu je potřeba znát mechanické vlastnosti ohýbaného materiálu. Proto musíme materiál 11 373 podrobit zkoušce tahem. Zkouška je podle normy EN ISO 6892-1.

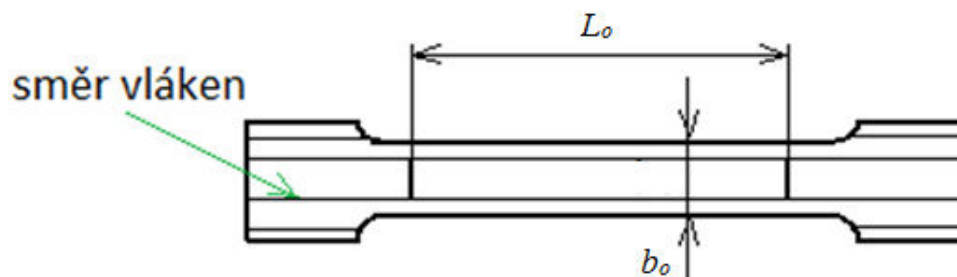


Obr. 3.1: Střížný nástroj pro výrobu normalizovaných vzorků pro tahovou zkoušku.

Číslo nástroje 3-681-3190.

Vzorky se nastříhaly z plechu o rozměrech 2 x 1,5 m o tloušťce 2mm na hydraulických tabulových nůžkách MS 2504 Durma. Výsledný tvar zkušebních vzorků se dokončil ve speciálním střížném nástroji s identifikačním číslem 3-681-3190 (obr. 3. 1) na výstředníkovém naklápěcím lisu LENP 63.

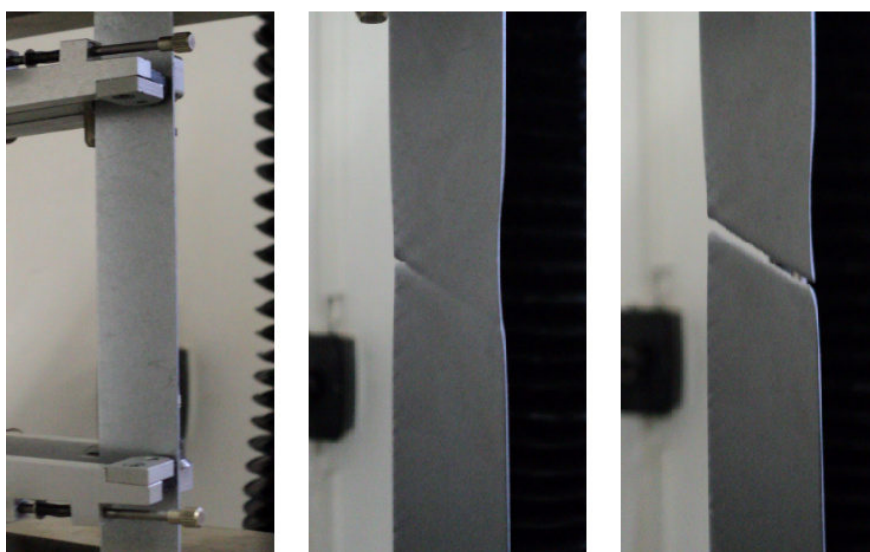
Na mechanické vlastnosti materiálu má vliv směr válcování, což se ztotožňuje se průvlakem vláken. A pro tuto práci se volil směr 0° dle obr. 3.2.



Obr. 3.2: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku EN ISO 377.

Popis práce

Vzorek stanovený normou dostatečně pevně utáhneme do čelistí s číslem označení 1245 na zkušebním zařízení pro mechanický test (číselný kód 56768). Vzorek musí být ve vertikální poloze, kolmo k čelistem. Následně se na vzorek připnul průtahoměr MFN A 4mm - 500 (číselný kód 55354), jehož rozsah je do 100mm. Jeho poloha musí být uprostřed - tam, kde se tvoří krček (obr. 3.3).



Obr. 3.3: Postup vytvoření krčku a trhliny na vzorku

Jestliže je vzorek zajištěný, tak se může program zahájit. V programu LabNET, který ovládá trhací stroj. Sleduje se průběh až do samotného přetržení. Výsledkem je diagram a materiálové údaje uvedené v tab 3.1.

Tento proces se opakuje pro všechny vzorky a z hlediska pravděpodobnosti pro získání nejpřesnější hodnoty se vytvoří hodnota průměrná, kterou považujeme za výslednou. Protokol o vykonané zkoušce a ukázka v programu LabNET je přidán v příloze.

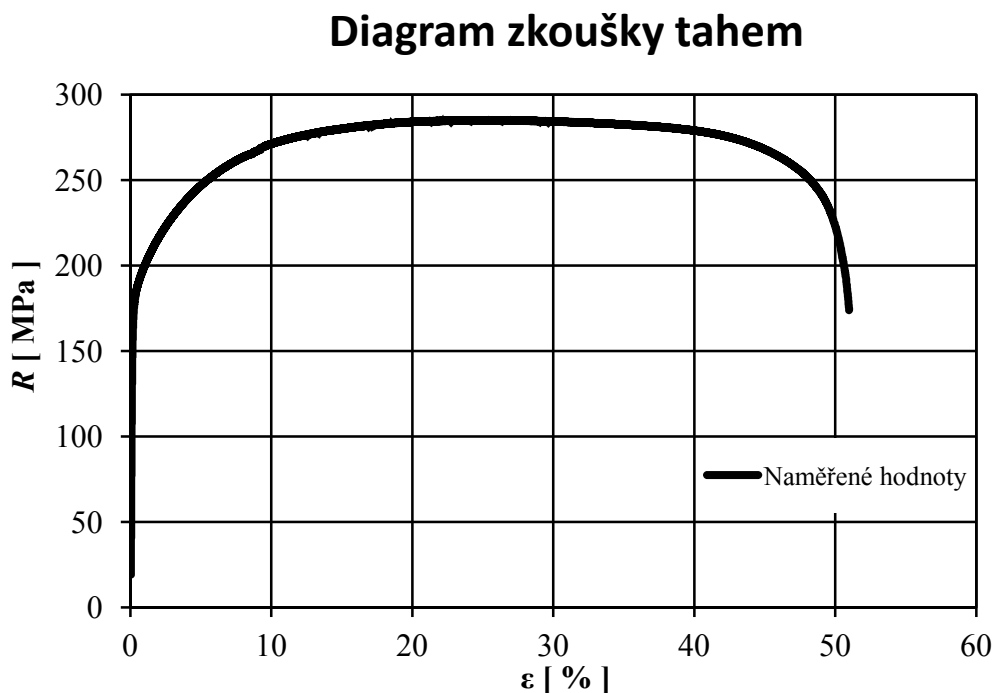
Výsledné hodnoty

Výsledkem je tahový diagram (obr. 3.4), na kterém je vidět průběh napětí R v závislosti na poměrném prodloužení ε . Sleduje se nárůst napětí a deformace za konstantní deformační rychlosti. Stroj během zkoušení zaznamenává několik veličin. V této práci se sleduje.

A_{50mm} ... tažnost [%]

$R_{p0,2}$...smluvní mez kluzu [MPa]

R_m ... mez pevnosti [MPa]



Obr. 3.4 Smluvní diagram zkoušky

Z diagramu vyplývá, že materiál 11 373 má charakteristiku hlubokotažné oceli, což představuje dobré mechanické vlastnosti pro tváření.

Dle normy ČSN EN ISO 6892-1 se zkouška provádí na několika vzorcích. Jejich hodnoty se zprůměrují a tím se získají nejpřesnější možnou hodnotu z hlediska pravděpodobnosti. [10]

Tab. 3.1: Mechanické vlastnosti oceli 11 373

Statická hodnota	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A_{50mm} %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	185,9	289,7	50,5
Směrodatná odchylka	2,2	3,6	1,2

3.3. Ohraňování

Tímto se tato práce dostává do nejdůležitější části a to do procesu samotného ohýbání. Tento proces se prováděl na ohraňovacím lisu APHS 2104 x 60 (obr. 3.5). Cílem bylo naměřit a vyhodnotit hodnoty odpružení v závislosti na odlišně zadaných mechanických vlastnostech materiálů v programu lisu. Tímto způsobem je možné vyjádřit vlivy na přesnost jednotlivých procesních parametrů.

Náplní této práce je sledování funkce tohoto lisu, který vzhledem k zadaným mechanickým vlastnostem materiálu ohýbá s určitou hodnotou odpružení

Ohraňovací lis APHS 2104 x 60

CNC hydraulický lis s nezávislými hydraulickými válci. Rám lisu je tvořen kovovým robustním svařencem. Válce jsou umístěny nahoře na bočnicích a jsou řízeny nezávisle. Řídicí systém odečítá polohu pomocí přesných lineárních pravítek HEIDENHEIN nebo GIVI MISURE a ovládá hydraulické proporcionální ventily, které řídí přítok oleje k jednotlivým válcům. Celý systém pohybu beranu pracuje na principu uzavřené regulační smyčky. Ve standardním vybavení je stroj již vybaven základní sadou obsahující horní dělený ohýbací nástroj a spodní multi-matrici. Tyto nástroje typu EUROSTAMP jsou indukčně povrchově kalené a broušené. [3]



Obr. 3.5: Ohraňovací lis APHS 2104 x 60.

Vybavení stroje:

- CNC grafické řízení DELEM DM 56 (obr. 3.8)
- Horní dělený ohýbací nástroj
BAYKAL BS - 10100/1
 $H = 67.0/85^\circ/R0.8$
- Spodní multi-matrice
BAYKAL BS - 21300/1
 $V16.0/86^\circ/R2$
 $H = 60$
- Posuvné přední podpěry
- Dvouruční ovládací pedál
- CNC řízený zadním doraz na kuličkových šroubech

Obecně se tyto lisy vyznačují vyšší lisovací silou a větší délkou ohybu, než je tomu u klasických ohýbacích strojů. Řízení stroje se provádí na řídicí jednotce ukotvené konzolou vedle stroje (obr. 3.8). Pro konání pohybu horní části nástroje jsou pod řídicí jednotkou dva pedály pro pohyb nahoru a dolů. Na bočnicích stroje jsou ukotvené na sobě nezávislé hydraulické válce. Pro přesné přiložení ohýbaného materiálu na dolní část nástroje se používá zadní doraz.

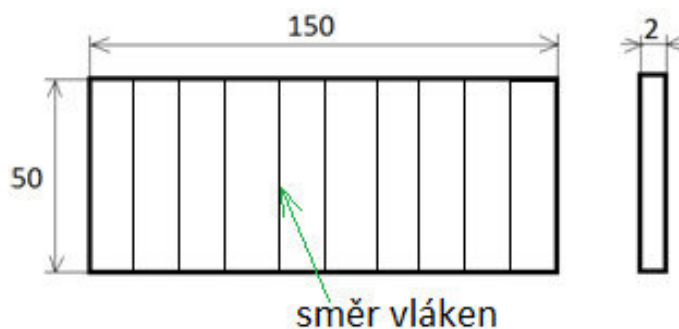
Technické údaje lisu jsou uvedeny v příloze 3.

Popis práce

Příprava vzorků

Pro vykonání měření je zapotřebí získat vhodné vzorky. Parametry vzorku musí mít dostatečně velké rozměry, protože ohraňovací lisy jsou vyráběny k vyšším silovým zatížením, tak se museli zvolit rozměry, které odpovídají samotným výpočtům stroje.

Na CNC hydraulických tabulových nůžkách MS 2504 Durma se z plechu 11 373 nastříhaly vzorky o rozměrech 150x50 (obr. 3.6). Vzhledem k teoretickým poznatkům v předešlé části práce se ví, že pro výpočet ohybové síly je důležitá šířka ($b = 150\text{mm}$) a tloušťka ($t = 2\text{mm}$) materiálu.

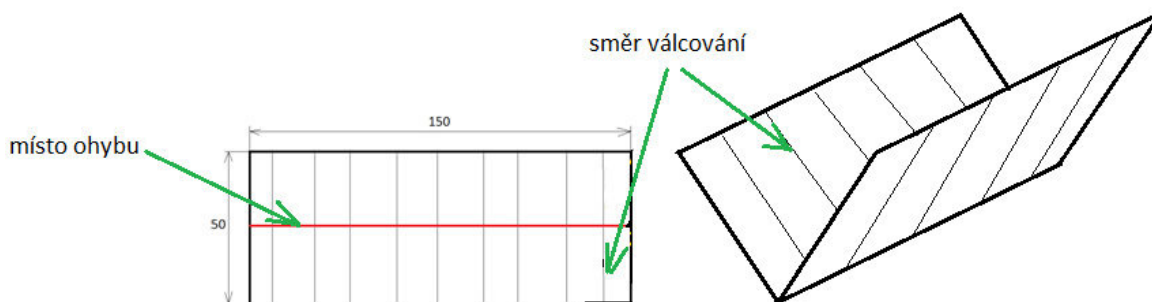


Obr. 3.6: Vzorek určený na ohraňování.

Ovšem největší vliv na velikost síly má tloušťka materiálu, kde je její hodnota v exponenciálním tvaru. Proto se zvolil relativně tlustší plech pro tuto práci s ohraňovacím lisem.

Zkrátka je potřebné mít takové rozměrové hodnoty, aby výslednou velikost síly dokázal lis sám spočítat a tím docílil přesného vykonání ohybového úkonu. Kdyby se hodnota síly nepohybovala v daném intervalu, tak by byly ohyby nepřesné, protože to program neumí přepočítat. Z ekonomického hlediska se zvolily nejmenší možné rozměry vzorků, které byly dostačující pro výpočet síly lisu.

Při přípravě vzorků se muselo hledět na směr válcování. Zatížení v různých směrech vláken nepatrně mění mechanické vlastnosti a vzhledem k rozsáhlosti tématu se zvolilo nastříhání vzorků se směrem válcování dle obr. 3.6 a obr. 3.7.



Obr. 3.7:

Osa ohybu je kolmá ke směru válcování, čímž docílíme největšího možného úhlu ohybu bez porušení celistvosti. Kdyby byla osa ohybu rovnoběžná s průběhem vláken, tak dříve překročíme kritickou hodnotu poloměru ohybu R_o/t .

Měření

Pro správnou funkci lisu bylo zapotřebí nastavit v řídicí jednotce (obr. 3.8) hodnoty, které se po celou dobu ohraňování neměnily. Zadávaly se rozměry vzorku, tedy šířka a tloušťka vzorku.

Ohraňovací lis dokáže ohnout vzorek o úhel, který se nastaví v programu lisu, v tomto případě je velikost $\alpha = 90^\circ$.

Další neměnnou hodnotou v procesu ohýbání je zadaná oprava úhlu α . Tímto lze předcházet předpokládanému odpružení, který je průvodním jevem každé ohýbací operace. V tomto programu lisu se oprava úhlu ohybu α neměnila, z toho důvodu se tato hodnota ponechá nulová.



Obr. 3.8: CNC grafické řízení DELEM DM 56.

Další zadávané hodnoty se týkaly mechanických vlastností materiálu, konkrétně mez pevnosti R_m a modul pružnosti E . Do řídicí jednotky se zadávaly hodnoty R_m v rozsahu $200 \div 1300$ MPa, což je považováno za reálný materiál, který se v praxi nejčastěji používá. Modul pružnosti E se zadával ve třech hodnotách, 210 000 MPa, 140 000 MPa a 70 000 MPa.

Po ohraňování bylo zapotřebí změřit skutečný úhel ohybu, a to za pomoci optického úhломěru DKP 5231 335/4 s přesností $2,5''$ (obr. 3.9). V poslední řadě se naměřené hodnoty porovnaly a vyhodnotily.



Obr. 3.9: Optický úhломěr [11]

3.4. Výsledné hodnoty ohýbaných vzorků

Aby se zpřesnilo měření, tak se použily 2 vzorky na každý ohyb nastaveného materiálu. Vzhledem k šířce ($b = 150 \text{ mm}$) mohlo docházet k natočení, jak je popsáno v teoretické části, proto se měření optickým úhломěrem provádělo na obou koncích vzorků. Z toho vyplývají čtyři hodnoty, ty se zprůměrují a výsledná hodnota je považována za konečnou a právě tu budeme porovnávat s dalšími zjištěnými.

Proces měření se prováděl na 66 vzorcích, kde se pro tři hodnoty modulu pružnosti E vyhodnocoval průběh odpružení β při různě nastavovaných mezích pevnosti R_m . První tabulka 3.2 je pro $E = 210\,000 \text{ MPa}$, druhá tabulka 3.3 je pro $E = 210\,000 \text{ MPa}$ a třetí tabulka 3.4 je pro $E = 70\,000 \text{ MPa}$. Pro všechny tabulky je R_m v rozsahu $200 \div 1300 \text{ MPa}$. Také jsou v každé tabulce hodnoty ohybové síly F [kN].

Pro každý ohyb je požadovaný úhel $\alpha = 90^\circ$, což se v žádném případě nepovedlo vlivem odpružení β , která se také uvádí v tabulce. Stejně tak je v tabulce skutečný úhel ohybu vzorku, tedy α' . Tyto úhly jsou uvedeny ve stupních a minutách.

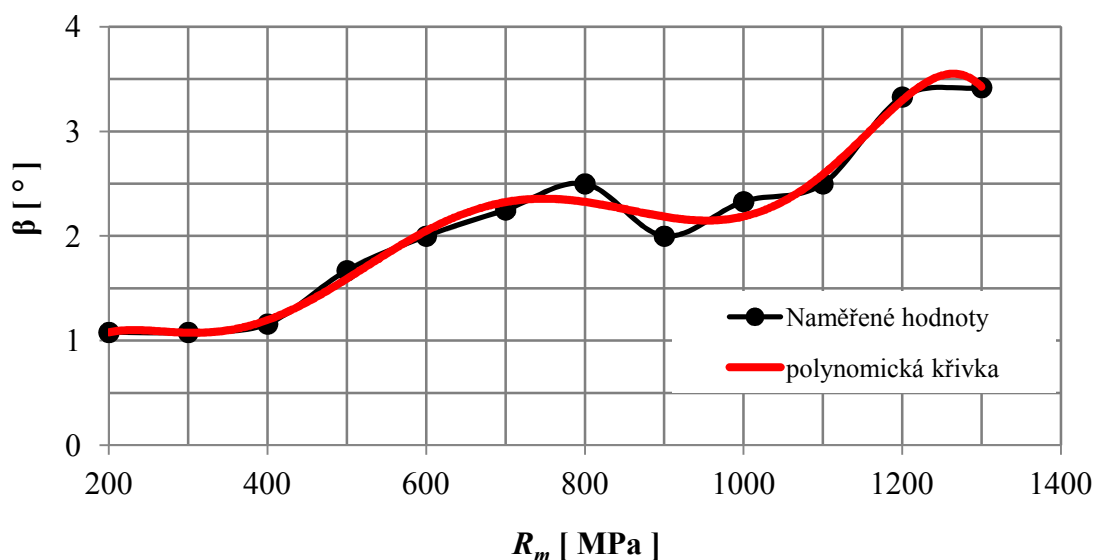
1) Průběh odpružení materiálu 11 373 pro $E = 210\,000\text{ MPa}$

Tab. 3.2: Výsledné hodnoty z měření.

číslo	R_m [MPa]	F [kN]	$\alpha' [^\circ]$	$\beta [^\circ]$
1	200	10	88° 55"	1° 05"
2	300	16	88° 55"	1° 05"
3	400	24	88° 50"	1° 10"
4	500	29	88° 20"	1° 40"
5	600	35	88° 00"	2° 00"
6	700	41	87° 45"	2° 15"
7	800	47	87° 30"	2° 30"
8	900	53	88° 00"	2° 00"
9	1000	59	87° 40"	2° 20"
10	1100	65	87° 30"	2° 30"
11	1200	71	86° 40"	3° 2"
12	1300	77	86° 35"	3° 25"

Stejně jak se předpokládalo v teoretické části bakalářské práce, s rostoucí mezí pevnosti R_m se snižuje přesnost ohybu, tedy odpružení roste. Rozmezí, ve kterém se odpružení nachází, je $1^\circ 05'' \div 3^\circ 25''$. Grafické vyjádření je na obr. 3.10.

$$E = 210\,000\text{ MPa}$$



Obr. 3.10: Průběh odpružení β při různě nastavených R_m pro $E=210\,000\text{ MPa}$.

Červeně označená polynomičká křivka šestého stupně aproximuje průběh naměřených hodnot s přesností $R^2 = 0,98$.

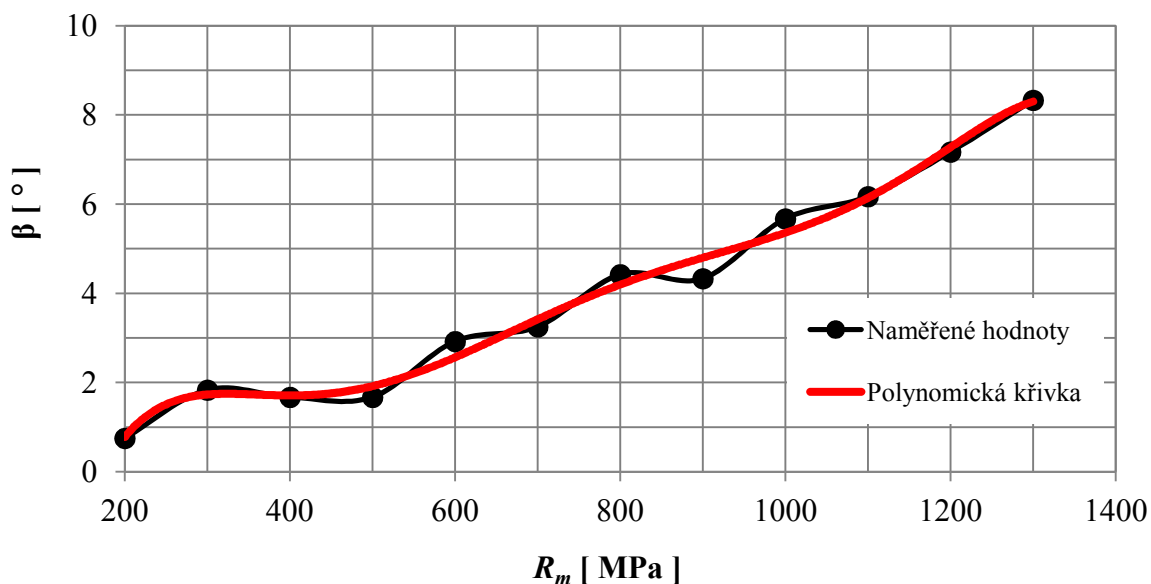
2) Průběh odpružení materiálu 11 373 pro $E = 140\,000\text{ MPa}$

Tab. 3.3: Výsledné hodnoty z měření.

číslo	R_m [MPa]	F [kN]	$\alpha' [^\circ]$	$\beta [^\circ]$
1	200	12	$89^\circ 15''$	$0^\circ 45''$
2	300	18	$88^\circ 55''$	$1^\circ 05''$
3	400	24	$88^\circ 20''$	$1^\circ 40''$
4	500	29	$88^\circ 20''$	$1^\circ 40''$
5	600	35	$87^\circ 05''$	$2^\circ 55''$
6	700	41	$86^\circ 45''$	$3^\circ 15''$
7	800	47	$85^\circ 35''$	$4^\circ 25''$
8	900	53	$85^\circ 40''$	$4^\circ 20''$
9	1000	59	$84^\circ 20''$	$5^\circ 40''$
10	1100	65	$83^\circ 50''$	$6^\circ 10''$
11	1200	71	$82^\circ 50''$	$7^\circ 10''$
12	1300	77	$81^\circ 40''$	$8^\circ 20''$

Opět se potvrzuje zvýšení odpružení s narůstající mezí pevnosti R_m . Rozmezí, ve kterém se odpružení nachází, je $0^\circ 45'' \div 8^\circ 20''$, což je o poznání větší rozsah než v předchozím případě. Grafické vyjádření je na obr. 3.11.

$E = 140\,000\text{ MPa}$



Obr. 3.11: Průběh odpružení β při různě nastavených R_m pro $E=140\,000\text{ MPa}$.

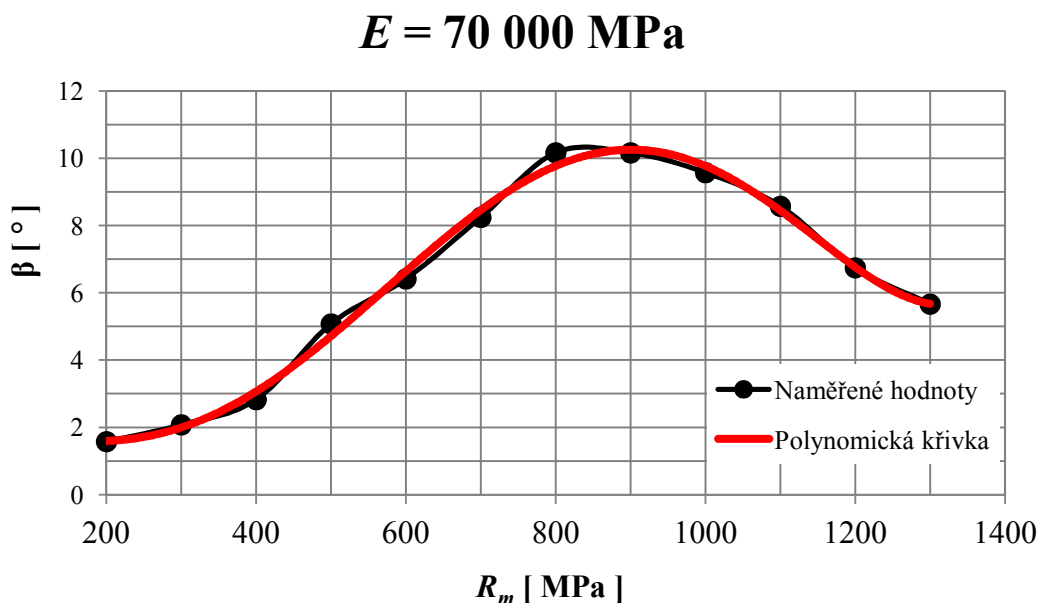
Polynomická křivka šestého stupně aproximuje průběh naměřených hodnot s přesností $R^2 = 0,98$.

3) Průběh odpružení materiálu 11 373 pro $E = 70\,000\text{ MPa}$

Tab. 3. 4 : Výsledné hodnoty z měření.

číslo	R_m [MPa]	F [kN]	$\alpha' [^\circ]$	$\beta [^\circ]$
1	200	12	88° 25"	1° 35"
2	300	18	87° 55"	2° 05"
3	400	24	87° 10"	2° 50"
4	500	29	84° 55"	5° 05"
5	600	35	83° 35"	6° 25"
6	700	41	81° 45"	8° 15"
7	800	47	79° 50"	10° 10"
8	900	53	79° 50"	10° 10"
9	1000	59	80° 25"	9° 35"
10	1100	65	81° 25"	8° 35"
11	1200	71	83° 15"	6° 45"
12	1300	77	84° 20"	5° 40"

V tomto případě se, stejně jako v předchozích modulech pružnosti E odpružení zvyšuje s rostoucí mezí pevnosti R_m , ale jen do rozhraní $800 \div 900\text{ MPa}$. Poté se odpružení s rostoucí R_m snižuje. Grafické vyjádření je na obr. 3.12.



Obr.3.12: Průběh odpružení β při různě nastavených R_m pro $E = 70\,000\text{ MPa}$.

Polynomická křivka pátého stupně aproximuje průběh naměřených hodnot s přesností $R^2 = 0,99$.

4. Vyhodnocení odpružení

Ve vygenerovaných tabulkách z ohýbání se může vyčíst, že ve všech případech modulu pružnosti E se síla mění pouze v závislosti na mezi pevnosti R_m . Růst síly F je v této závislosti lineární a modul pružnosti nám velikost zatížení vůbec neovlivňuje.



Obr. 3.12: Ohraněný vzorek, změřený a zdokumentovaný.

Naopak odpružení β se značně mění v závislosti na E . Pro zadaný materiál 11 373, se zvolený modul pružnosti E shodoval s první variantou nastavenou na programu lisu, tedy $E = 210\,000$ MPa. V tomto případě je rozsah odpružení o hodnotě $1^\circ 05'' \div 3^\circ 25''$ nejmenší vzhledem ke všem navoleným mezím pevností R_m . Tímto se potvrzuje, že se odpružení β zvětšuje z rostoucí meze pevností R_m .

Pro druhý navolený modul pružnosti $E = 140\,000$ MPa, kde se hodnota neshodovala s ohýbaným materiálem, se rozsah velikosti odpružení viditelně změnil na $0^\circ 45'' \div 8^\circ 33''$. Tímto se prokazuje teoretická část o vlivu modulu pružnosti na odpružení. A také je zde vidět větší nárůst odpružení β při zvyšujících se hodnotách meze pevnosti R_m .

U třetího grafického vyjádření pro $E = 70\,000$ MPa se odpružení β zvyšuje ještě rychleji než u grafu pro $E = 140\,000$ MPa. Zde je opět vidět, že s klesajícím modulem pružnosti E se odpružení zvětšuje. Také je zde dosažení nejvyššího odpružení a to už u hodnoty meze pevnosti $R_m = 800$ MPa, kde je odpružení β rovno $10^\circ 10''$. A opět se potvrzuje nárůst odpružení s rostoucí mezí pevnosti R_m . Tento fakt platí do právě zmiňované meze pevnosti $R_m = 800$ MPa, další průběh odpružení

se s rostoucí mezí pevnosti R_m snižuje. Tento průběh je zapříčiněn polohou naprogramované špičky horního ohýbacího nástroje v ose y.

Tato špička se mění s nastavenými mechanickými vlastnostmi v programu lisu. Během měření se vypožadovalo, že s rostoucí mezí pevnosti R_m se špička horního ohýbacího nástroje posunula o určitou hodnotu víc do materiálu. Stejně tak se poloha špičky nástroje mění s různým modulem pružnosti E , tato hodnota se mění v řádech setin a pro případ grafického vyjádření pro $E = 70\,000$ MPa, se tím vysvětluje snížení odpružení z $R_m = 800$ MPa do $R_m = 1300$ MPa. Čím menší je modul pružnosti E a větší mez pevnosti R_m , tím se naprogramovaný bod horního ohýbacího nástroje polohuje víc do materiálu, čímž dochází ke kalibraci, tedy ke snižování odpružení β , protože skutečný materiál má menší mechanické vlastnosti než je navoleno na řídicí jednotce, tedy v programu lisu.

Na obrázku 3.12 je uveden ohraňený a změřený vzorek, na kterém jsou napsané hodnoty důležité pro vyhodnocení tohoto experimentu.

5. Závěr

Tato práce se zabývá sledováním procesních parametrů na přesnost ohýbaného výlisku na CNC hydraulickém ohraňovacím lisu APHS 2104 x 60. Závěrem byly zjištěny vlivy na ohýbané vzorky z materiálu 11 373, konkrétně se sledovala velikost odpružení β při různě nastavených mechanických vlastnostech v programu lisu.

Ohybovou sílu F a posunutí naprogramované špičky horní části ohybového nástroje si lis vypočítá podle zadaných mechanických vlastností materiálu v programu lisu sám. Tímto si navolí neoptimálnější procesní parametry pro vykonání ohraňování.

V experimentu se ohýbalo 66 vzorků o rozměrech 150x50mm o tloušťce $t = 2$ mm z oceli 11 373, ze kterých se optickým úhloměrem naměřily hodnoty uvedené v tabulkách 3.2, 3.3 a 3.4. Grafické vyjádření pro tyto tabulky ukazují průběh odpružení β při různě nastavených R_m . Tímto se potvrzuje tvrzení z teoretické části, že s rostoucí mezí pevnosti R_m se velikost odpružení β zvětšuje.

Pro obr. 3.10, kde je znázorněný průběh pro $E = 210\,000$ MPa, je odpružení β při nejvyšší mezi pevnosti $R_m = 1300$ MPa na hodnotě $3^\circ 25''$. Pro obr. 3.11, kde je znázorněný průběh pro $E = 140\,000$ MPa je odpružení β při nejvyšší mezi pevnosti $R_m = 1300$ MPa na hodnotě $8^\circ 20''$. Tímto se kromě vlivu meze pevnosti R_m potvrzuje i snížení přesnosti ohybu s menším modulem pružnosti E . Pro obr. 3.12, kde je znázorněný průběh pro $E = 70\,000$ MPa, je odpružení β při mezi pevnosti $R_m = 800$ MPa na nejvyšší hodnotě odpružení $\beta = 10^\circ 10''$. Po překročení této hranice se odpružení snižuje. Tento jev je zřejmě zapříčiněn polohou naprogramovaného bodu horního ohýbacího nástroje, který se s menším modulem pružnosti E polohuje směrem do materiálu v setinách milimetrů. Takže v grafu (obr. 3.12) se od meze pevnosti $R_m = 900$ MPa a výše začíná odpružení snižovat vlivem polohy horního ohýbacího nástroje, který program lisu přepočítá vlivem zadanému modulu pružnosti E a mezi pevnosti R_m .

6. Seznam literatury

- [1] VALČÍK, Jan. *Moderní metody ohýbání plechů*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Eva Šmehlíková.
- [2] *MM průmyslové spektrum* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/>
- [3] *FSv CVUT: katedra mechaniky [k132]* [online]. (C) 1998-2013 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://mech.fsv.cvut.cz/web/>
- [4] PETRUŽELKA, Jiří. *Strojírenské tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 807078878X.
- [5] MARCINIAK, Zdzislaw. *Teorie tváření plechů*. Praha: SNTL, 1964. ISBN 621.777.001.
- [6] MORAVEC, Ján. *Ohýbanie a ohýbacie nástroje*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně v EDIS, 2003. ISBN 80-8070-040-0.
- [7] BOLJANOVIC, V. *SheetMetal Forming Processes and Die Design*, 1.st ed. New York: Industrial Press. 2004. 219p. ISBN 0-8311-3182-9.
- [8] ZRZAVÝ, Jaroslav. *Technologie tváření tenkých plechů ohýbáním*. Brno, 2009. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Dvořák. CSc.
- [9] *Prodej obráběcích strojů, pásových pil a pilových pásů* [online]. © 2010 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.novy-stroje.cz/>
- [10] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, © 2009.
- [11] *Microtes - Prodej a servis měřidel* [online]. © 2009 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.microtes.cz/>

7. Seznam příloh

1 x Protokol tahové zkoušky dle EN ISO 6892-1

1 x Tahová zkouška v LabTech dle EN ISO 6892-1

1 x Technické údaje ohraňovacího lisu

1 x CD

Příloha 1

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

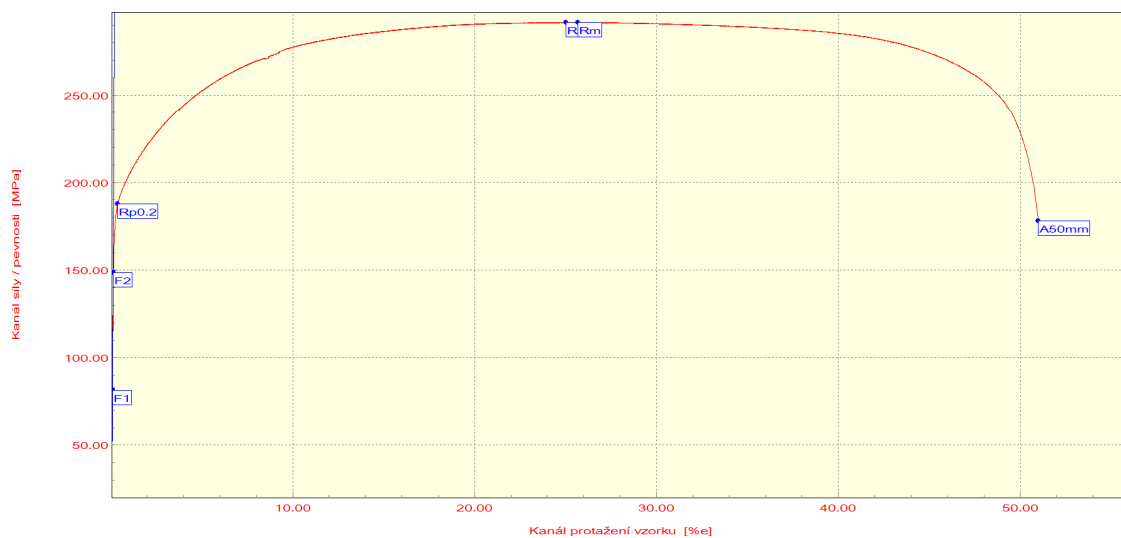
EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN 11373
Norma: : ČSN EN ISO 6892-1
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Rozměr vzorku: : 2 x 20.15 [mm]
Vypracoval: : Petr Novotný
Datum zkoušky: : 15. 3. 2013
Směr odebrání vzorku : 0°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %
Tl 1	187.51	291.7	50.81
Tl 2	188.62	294.7	48.88
Tl 3	183.47	285.9	51.33
Tl 4	184.15	286.6	49.82
Tl 5	185.78	289.5	51.85

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	185.90	289.7	50.54
Směrodatná odchylka	2.18	3.6	1.19



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

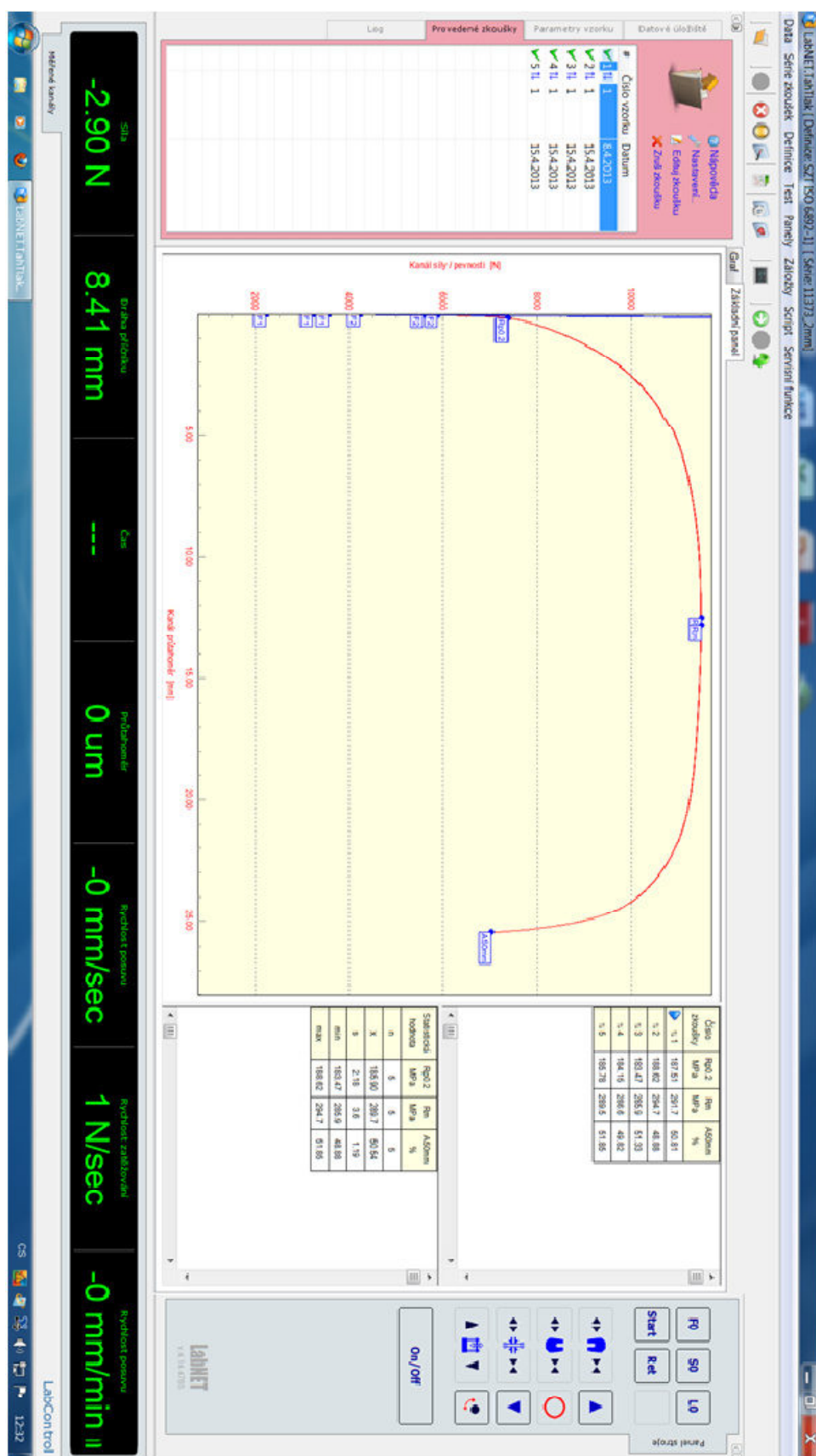
Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 2

Tahová zkouška v LabTech dle EN ISO 6892-1



Příloha 3

Technické údaje ohraňovacího lisu:

APHS 2104x60		Typ
600	kN	Výkon
2 100	mm	Pracovní délka
1 600	mm	Vzdálenost mezi hočnicemi
210	mm	Zdvih
410	mm	Vyložení
475	mm	Světlost rozevření
150-130-10	mm/sec.	Rychlost posuvu návratu pracovní
2 100	mm	Délka
1 580	mm	Šířka
2 542	mm	Výška
5,5	kW	Výkon motoru
5,4	t	Hmotnost

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2013

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use. I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and consultant.

Date: 24. 5. 2013

Signature